

**UNIVERSITÀ DI PISA**



**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica**

Tesi di laurea

**ANALISI STRUTTURALE LINEAE E NON-  
LINEARE DI ELEMENTI TUBOLARI  
STRATIFICATI IN COMPOSITO**

Candidato:

*Andrea Cuccolini*

Relatori:

*Prof. Marco Beghini*

*Prof. Leonardo Bertini*

*Ing. Massimo Hvala (Nuova Connavi)*

*Ing. Andrea Raggi (Nuova Connavi)*

Sessione di Laurea del 23/06/2005

Archivio tesi Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica 11/LSM

Anno accademico 2004/2005

Consultazione consentita

## **SOMMARIO**

L'argomento di questa tesi è l'analisi strutturale di elementi tubolari, traviformi, con geometria cilindrica o conica, incastrati ad un'estremità e caricati all'altra, stratificati e realizzati in composito. Tramite programmi sviluppati in ambiente MATHCAD è stato analizzato il comportamento macromeccanico e micromeccanico del materiale per definirne le proprietà di rigidezza e di resistenza. Si sono poi creati, sempre in ambiente MATHCAD, dei moduli per l'analisi di rigidezza e di resistenza degli elementi tubolari. La fase successiva è stata incentrata sulla ricerca in letteratura di modelli per "shells" cilindriche e/o coniche che consentissero il calcolo "manuale" delle frequenze proprie e dei carichi critici assiali e trasversi per le condizioni al contorno descritte. Non trovando alcun modello di pratico utilizzo, si è ricorso ad un'analisi agli elementi finiti, tramite il codice ANSYS. Si è studiato come implementare i materiali compositi e si sono creati modelli parametrici in forma "batch" per poter effettuare analisi modali, statiche e a "buckling", lineari e non lineari, con carichi assiali, trasversi o con puro momento flettente. Infine si è impostato una analisi parametrica della sequenza di stratificazione per ottenere un comportamento strutturale con migliori prestazioni.

## **ABSTRACT**

The subject of this work is the structural analysis of tubular beam-shaped elements, clamped at one end and loaded at the another, having cylindrical or conical geometry, made by layered composite material. In the beginning, MATHCAD files have been created in order to define stiffness and strength material properties, by means of macromechanical and micromechanical approaches. Other MATHCAD files have been realized to carry out a first structural analysis, in particular for evaluating stiffness and static strength. The following part was pointed to check the existence of a model in the literature, for cylindrical and/or conical shells, that allows "manual" calculations of natural frequencies, axial and transverse buckling loads. As no practical model was found, a finite elements analysis was performed by ANSYS. A way to implement the composite materials in this program has been studied and parametric batch files have been created to carry out modal analysis, linear and non-linear static and buckling analysis with axial and transverse load and pure bending. At the end, a stacking sequence optimization has been made.

# INDICE

<b>1. Introduzione</b>	<b>pag. 7</b>
<b>2. Definizione del comportamento materiale</b>	<b>pag. 10</b>
2.1 Legami costitutivi	
2.1.1 Comportamento elastico	
2.1.2 Comportamento termo-igro-elastico	
2.2 Criteri di resistenza	
2.3 Macromeccanica della rigidezza della lamina	
2.4 Macromeccanica della resistenza della lamina	
2.4.1 Criterio di resistenza che meglio ricalca il comportamento del materiale	
2.5 Micromeccanica della rigidezza della lamina	
<b>3. Analisi statica lineare dell'elemento tubolare in MATHCAD</b>	<b>pag. 34</b>
3.1 Classica teoria del laminato	
3.2 Analisi statica lineare dell'elemento tubolare	
<b>4. “Buckling” e vibrazioni di una shell cilindrica in letteratura</b>	<b>pag. 49</b>
4.1 Approccio di Lou e Yaniv	
4.2 Approccio di Greenberg e Stavsky	
<b>5. Metodologia per l'analisi strutturale dell'elemento tubolare in ANSYS</b>	<b>pag. 59</b>
5.1 Materiali compositi in ANSYS	
5.1.1 “Layered elements”	
5.1.2 Definizione della configurazione a strati (“layered”)	
5.1.2.1 Definizione delle proprietà di ogni singolo “layer”	
5.1.2.2 Definizione delle matrici costitutive	
5.1.2.3 Strutture a “sandwich” e “multiple-layered”	

#### 5.1.2.4 “Node offset”

#### 5.1.3 Criteri di resistenza

### 5.2 Costruzione del modello

#### 5.2.1 Scelta del tipo di elemento

#### 5.2.2 Definizione dei parametri

#### 5.2.3 Costruzione della geometria

#### 5.2.4 Carichi e spostamento imposto

### 5.3 Analisi modale

### 5.4 Analisi statica lineare

### 5.5 Analisi statica non lineare

### 5.6 Analisi a “buckling” lineare

### 5.7 Analisi a “buckling” non lineare

## **6. Risultati ottenuti dall’analisi in ANSYS**

**pag. 90**

### 6.1 Analisi modale

### 6.2 Analisi a “buckling lineare”

### 6.3 Analisi a “buckling” non-lineare

### 6.4 Analisi statica non-lineare

## **7. “Ottimizzazione” della “stacking sequence” per carico critico e rigidezza**

**pag. 106**

## **8. Conclusioni**

**pag. 110**

## **9. Bibliografia**

**pag. 111**

## **10. Appendice**

**pag. 114**

### 10.1 Catalogazione degli articoli sull’ instabilità e sulle vibrazioni di “shell” cilindriche in composito

### 10.2 “Buckling” e resistenza delle dieci sequenze di impilamento

### 10.3 Matrice Omega per le dieci sequenze di impilamento